

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.017

直流接地极招弧角熄弧特性研究

张冯硕¹, 李健¹, 吴高波¹, 徐志坚², 李化², 刘毅², 李显东²

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院, 武汉 430074;

2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 从电弧的电位梯度及伏安特性方面总结了开放空间电弧的研究现状,综述了影响电弧特性的主要因素,简要叙述电弧伏安特性作为直流电弧熄弧判据的原理,分析比较了目前直流招弧角间隙熄弧能力工程设计的两种思路,并提出了不同思路所面临的和亟待解决的问题。

关键词: 招弧角; 直流电弧; 伏安特性; 熄弧

Study on Arc-extinguishing Characteristics of Arcing Horn on DC Grounding Line

ZHANG Fengshuo¹, LI Jian¹, WU Gaobo¹, XU Zhijian², LI Hua², LIU Yi², LI Xiandong²

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group,

Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The current research status of the arc in the open air are presented from the aspects of potential gradient and the volt-ampere characteristics. The main factors of arc characteristics are summarized. The principle of arc volt ampere characteristics as the criterion of DC arc-extinguishing are described. Two approaches of the DC arcing horn engineering design are analysed and compared. The problems of different approaches are also put forward

Key words: arcing horn; DC arc; volt-ampere characteristic; arc extinguishing

0 引言

直流接地极线路具有输送电流大、线路电压低、耐雷水平较低、要求发生接地故障后具备自熄弧能力等特点。由于接地极线路传输的是直流,一旦间隙击穿,其故障电流为稳定的直流电流,由于没有周期性过零点,自熄弧较困难。近年来,中国运行的直流线路多次发生接地极线路故障导致直流线路发生单极闭锁等故障。如2012年7月,500 kV伊敏换流站就曾发生直流系统在单极金属回线转单极大地回线操作时,发生绝缘子炸裂导致导线脱落。分析原因,主要是接地极线路的绝缘间隙在操作过电压击穿后未能有效熄弧导致。

中国直流接地极线路的设计原则,主要参考的是±500 kV天广直流时泰西蒙提供的伊泰普直流线

路的设计原则和试验数据。但中国直流线路的工作电流随着输送容量的增加持续增加,从葛上、天广直流的1 200、1 800 A,发展至锦苏直流线路额定电流为4 750 A,目前正在开展设计的哈郑、溪浙线额定电流达5 000 A。技术条件与早期工程相比发生了根本性的变化。

对于高压直流接地极线路来说,电流增大、工作电压升高,导致电弧更加难以熄灭,国内一直以来缺乏针对直流招弧角熄弧能力方面的研究,因此,文中主要介绍开放空间的直流电弧特性的研究现状以及目前国外典型的直流招弧角的工程应用方案。

1 开放空间电弧特性研究

1.1 开放空间电弧

雷击架空输电线路在招弧角并联间隙处产生的电弧以及绝缘子串发生工频闪络形成的电弧,都属

收稿日期:2015-11-27; 修回日期:2015-12-28

于开放空间中的大电流电弧放电现象。这种处在开放环境中的电弧,运动规律无序,形状复杂,电弧长度一直不断变化。

一般采用电弧的伏安特性曲线来描述电弧的熄灭特性,研究表明电弧伏安特性可按某一电流阈值 I_t 划分为小电流和大电流区间,见图1。

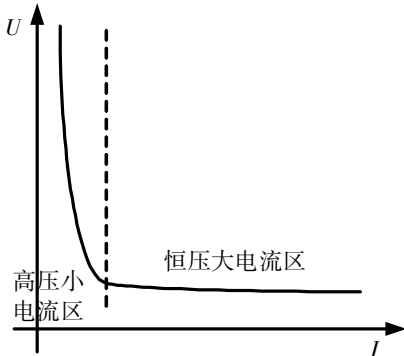


图1 固定间隙长度电弧的伏安特性

Fig. 1 Arc volt-ampere characteristics of fixed length

当电流小于 I_t 时,为小电流区间,电弧电压 U_h 随着电弧电流 I_h 的增加而降低,电弧功率($P_h=U_h I_h$)可近似认为是常数;当电流大于 I_t 时,为大电流区间,电弧电压 U_h 随电弧电流 I_h 增大变化缓慢。这是因为在小电流区间,电弧等离子体仅局部电离,当电流大于某一阈值 I_t 时,等离子体全部电离,电流 I_h 继续增加,电弧电离程度变化不大^[1-2]。

1.1.1 电流阈值 I_t

电弧长度越长,对应的伏安特性曲线相对位置越高,因此,电流阈值 I_t 亦与电弧长度密切相关。Stokes 和 Oppenlander 依据 0.1~1 kA 的指数衰减和 30 A~20 kA 的工频电流试验结果,拟合出电流阈值 I_t 与电弧长度 l 的关系,见式(1)^[3]。

$$I_t = 10 + 0.2l. \quad (1)$$

式(1)中, l 为试验中采用的招弧角间隙长度,分别为 5、20、100、500 mm。

1.1.2 电弧电位梯度

电弧的伏安特性曲线表明:在大电流区间时,电弧电压随电弧电流增大变化缓慢,而电弧长度不变,因此电弧电位梯度亦较为稳定。文[2]中的研究表明,在电流大于 50 A 时,直流电弧电位梯度 E_h 约为 1.2 V/mm;Storm 对 3.2~1 220 mm 的间隙进行 60 Hz 电弧燃弧试验研究,结果表明电流在 68 A~21.75 kA 时,平均电弧电位梯度为 1.34 V/mm,其中,在电流小于 5 kA 时,电弧平均电位梯度在 1.22~1.30 V/mm;电流在 10~20 kA 时,电弧平均电位梯度为 1.5 V/mm^[4]。

1.1.3 电弧伏安特性公式

早期对直流电弧主要集中于小电流、短间隙方

面,分别通过不同的直流电弧燃弧实验得到了直流电弧的伏安特性,并将其拟合为对应的伏安特性公式^[4-10]。研究结果表明表征电弧伏安特性的拟合公式多采用式(2)的经验公式或其变换形式

$$U_h = A + Bl + \frac{C + Dl}{I_h^n}. \quad (2)$$

式(2)中: A 为阴极和阳极电压降,取值区间在 20~40 V; B 为弧柱区的电位梯度,V/mm; l 为电弧长度,mm; C 、 D 分别为与电弧非线性特性相关的常数; n 与电极材料有关的常数,与电极材料的沸点大致呈线性关系。在空气中, $n=2.62 \times 10^{-4} T$, T 为电极材料的沸点,K;Nottingham 在空气介质中得到锌、钨、石墨以及氧化铜电极的 n 值分别为 0.35、1.38、1.0、0.67,值得指出的是, n 实际值随着试验条件的变化有所不同。

然而,各自拟合的公式基于有限次数的试验结果,经验公式中的常数和电极材料、间隙长度以及气体种类等相关,由于没有建立标准的试验步骤和一致的测量方法,难以得到确定性的结论。

1.2 影响电弧特性的因素

影响电弧特性的因素众多,包括热对流、电磁力、电极材料、电弧熄灭和重燃、等离子体射流等。目前,国内外对开放空间电弧的影响因素的研究主要集中在电磁力、热浮力、风力等因素上。电弧在燃烧过程中,它在空气中往返游动,并形成很多曲折的弧道。在弧道叠合的地方,又不断短接,又重新延长,弧道时长时短。电弧的运动不仅受到电磁力的作用,还受到外界风力的影响,同时受电弧自身高温而产生的热浮力影响

1.2.1 电磁力

电磁力通过影响电弧的运动改变电弧的运动方向、形态和长度,从而影响电弧的燃烧和熄灭。在输电线路中,电弧所处空间的磁场主要是由流过输电线路、招弧角并联间隙、绝缘子串金属配件、杆塔、避雷线和电弧本身的电流产生的。

谷山强等针对交流高压输电线路的实际情况,采用链式模型计算电弧受到的电磁力,计算结果表明,对于单侧电源线路,招弧角安装在远离电源侧;对于双侧电源线路,招弧角安装在远离短路电流大电源侧,在无法判断在双侧电源短路电流大小时,采取招弧角垂直于导线的安装方式^[11-12]。而司马文霞亦采用链式模型对招弧角电弧转移速率进行了仿真研究,仿真中考虑了热浮力的影响。结果表明电磁力在电弧的运动中起主导作用,而电磁力大小与电弧电流以及招弧角形式密切相关。当电弧电流由 160 A

增大至 2 000 A 时, 电弧转移到招弧角末端时间由 330 ms 减少至 24 ms; 且对电弧电磁力最大的招弧角电极结构对电弧的转移速率亦相对较快^[13-14]。

上述研究结果均表明, 电磁力在电弧的运动中起主导作用, 决定着电弧的运动方向, 电磁力越大, 电弧运动速率越快, 形态变化越剧烈, 电弧拉长得越显著。

1.2.2 热浮力

热浮力属于空气对流的一种形式。电弧由于自身温度较高, 会与周围冷空气形成对流, 使得电弧上浮发生形态变化。在水平放置的招弧角上, 电弧受到热浮力可使其上浮拉长从而影响电弧特性。司马文霞等在交流电弧运动研究中, 考虑到了热浮力对弧根运动的影响, 对电弧进行仿真计算, 结果表明当电弧电流为 160 A 时, 热浮力仅 0.015 5 N, 而同条件下的电磁力在 0.04~0.065 N 之间波动, 电磁力明显大于热浮力^[13]。根据 Stokes 和 Oppenlander 的研究, 对于小电流电弧, 电弧运动主要受到对流散热的影响, 小电流的运动存在较大分散性; 在电流大于 30 A 时, 电磁力起到主导作用, 大电流电弧测试可取得与理论较为一致的结论^[3]。

1.2.3 风力

风力不仅能够影响电弧的运动, 同时亦能加强电弧所在环境的冷却条件, 因此风力对电弧熄灭有重要影响。

在对数十 A 量级的潜供电流的研究中, 风速对电弧熄灭时间的影响显著。1975 年曹荣江等开展的潜供电流模拟系统试验, 研究结果表明, 在间隙距离 690 mm、电流最大为 65 A 的条件下, 电流和风速对灭弧时间的影响占主导地位, 电弧电流为 17.34 A 时, 风速从 0.6 m/s 提高到 2.5 m/s 时, 电弧熄弧时间从 0.3 s 下降到 0.1 s^[15]。

1967 年, 文^[14]在 Gotland 直流联络线的测试结果表明, 在间隙距离为 0.4~2 m 时, 电流为 50~270 A 时, 考虑到风速的影响, 电弧的平均电位梯度达到 2 V/mm, 而在静止空气中为 1 V/mm。后 1984 年, 在伊泰普(ITAIPU)工程的设计中, 使用的有风时的数据, 默认电弧的伏安特性是无风条件下的两倍^[16-17], 认为考虑风力作用下电弧更加容易熄灭。

1.3 直流电弧熄弧判据

从电路角度看, 直流电弧是一非线性电阻, 阻值随电流及其他因素而变化, 具有电弧的 R-L 直流电路示意图见图 2。图 2 中: E 为直流电源电压; R 为回路总电阻; L 为回路总电感; U_h 为电弧两端电压。

起弧后回路电压平衡方程式为

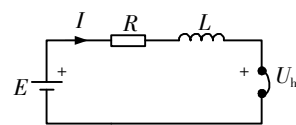


图 2 具有电弧的 R-L 直流电路

Fig. 2 R-L circuit with DC arc

$$E = L \frac{dI_h}{dt} + I_h R + U_h \quad (3)$$

当电弧稳定燃烧时, 电流稳定无变化, 满足

$$L \frac{dI_h}{dt} = 0 \quad (4)$$

因此, 电弧稳定燃烧时, 回路电压平衡方程式为

$$U_h = E - I_h R \quad (5)$$

而电弧稳定燃烧时, 电弧自身又必须满足电弧伏安特性 $U_h = f(I_h)$ 。采用图解法, 联立式(5)见图 3。

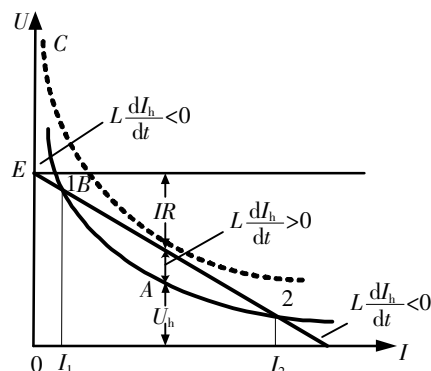


图 3 电弧伏安特性与直流回路特性结合

Fig. 3 Arc volt-ampere characteristics combined with DC circuit characteristics

图 3 中: 曲线 A 表示电弧伏安特性曲线(并假定电弧长度在整个燃烧过程中保持不变); 直线 B 表示电弧稳定燃烧时回路电压平衡方程。两条曲线的交点 1 和 2 称为电弧的稳定燃烧点, 一般将点 2 称为稳定燃烧点, 点 1 称为视在稳定燃烧点。

通过简单的分析可知, 当两条曲线有交点时, 表明该回路能维持电弧持续燃烧; 反之, 表明电弧最终会熄灭。因此, 要使电弧熄灭必须满足

$$U_h > (E - I_h R) \quad (6)$$

即当电路中电源电压不足以维持电弧对应电流下的稳定燃烧电压与线路压降之和时, 直流电弧将被熄灭。

值得一提的是, 电弧的伏安特性与电弧的长度和冷却条件相关, 电弧长度越长, 冷却条件越好, 对应的伏安特性曲线相对位置越高^[18], 对应相同的直流回路特性曲线, 其相交的可能性越小, 表明电弧越容易熄灭。

在直流招弧角熄弧能力的研究中, 可以结合电弧伏安特性曲线与系统伏安特性曲线判断电弧熄灭

与否。然而,由于电弧的伏安特性与电弧最终的长度有关,影响电弧长度的因素众多,故该方法的界定能力有限,分析见第2节直流招弧角工程应用。

2 直流招弧角间隙熄弧能力工程研究

在直流招弧角的工程应用研究方面,国内缺乏相关经验,大多数参照伊泰普(ITAIPU)工程的测试数据进行设计,加拿大 Teshmont 在 HVDC 线路的中性线招弧角的设计中也使用了伊泰普(ITAIPU)工程的理论分析数据。

伊泰普工程中采用了两种思路对其接地极招弧角的熄弧能力进行研究分析^[19]。其一为理论分析数据。主要思路为采用电弧伏安特性与系统伏安特性结合界定电弧是否熄灭;其二为试验及测试数据。主要思路为模拟实际接地极线路招弧角上的燃弧条件判断电弧是否熄灭。

2.1 伊泰普(ITAIPU)设计方法

1)理论分析数据。理论分析中,综合前人的交流电弧和直流电弧研究结果,认为对于 0.2~2 m 间隙距离,电流在 50~270 A 时,电弧平均电位梯度为 1 V/mm,考虑到空气中开放性电弧收到风的影响,基于 Kohler 的研究结果,默认将平均电位梯度取为 2 V/mm,将静止空气中的伏安特性提高了 2 倍^[16-17],见图 4。

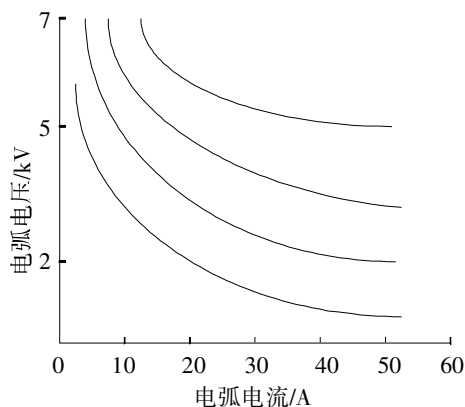


图4 理论分析招弧角间隙的伏安特性

Fig. 4 Volt-ampere characteristics of arcing horns in theoretical analysis

基于图4,采用电弧自身伏安特性和系统伏安曲线结合的分析方法,得到的招弧角间隙长度在不同杆塔电阻情况下的设置。结果表明,当杆塔接地电阻为 50 Ω 时,招弧角间隙距离应不小于 1.2 m;当杆塔接地电阻为 20 Ω 时,招弧角间隙距离应不小于 1.5 m。

然而,电弧的伏安特性与电弧长度相关,在采用电弧的伏安特性作为电弧熄灭判据时必须对电弧长

度进行考量。电弧长度受电磁力、热浮力、风力等众多因素的影响,在实际输电线路仅电磁力就受到杆塔、输电线和招弧角的相对位置及故障点位置的影响,因此电弧长度的考量成为了电弧伏安特性作为电弧熄灭判据在工程实际运用中的难点,也是亟待解决的问题。

2)试验及测试数据。在米兰实验站开展招弧角的试验研究,对水平、垂直间隙的招弧角的熄弧特性进行研究^[17]。试验回路见图5。图5中,并联电阻 R_2 和垂直和水平间隙并联,用于模拟接地极导线流过电流的电磁力方向。不考虑电弧电阻,通过改变 R_T 的大小可以预估测试电弧电流峰值 I^* ,测试电流范围为 55~566 A。

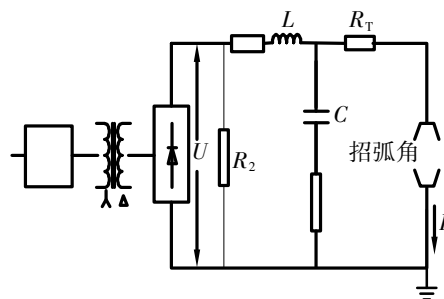


图5 伊泰普工程招弧角试验研究回路

Fig. 5 Test loop in the research of ITAIPU project

电压 U 取 2 300、4 300 V,是根据伊泰普工程接地极线路间隙两端的恢复电压选取的; I 是实际测量回路电流的峰值。

判断在某一间隙下最大临界熄弧电流的方法为:固定间隙距离和电压 U ,调节 R_T 值,逐渐增加电流 I^* 。每个电流下测试次数不小于 10 次,在电流逐级升高的过程中,只要出现在某一电流下电弧不能熄灭的情况,则确定该电流的上一电流等级为对应的最大临界熄弧电流。伊泰普对普通耐张型招弧角(非羊角型)不同间隙距离下的最大临界熄弧电流测试结果见表1。

表1 伊泰普(ITAIPU)工程招弧角试验数据

Table 1 Test data of arcing horns in ITAIPU project

测试电压 U/V	间隙距离/m	I^*/A
2 850	0.20	55
	0.35	200
	0.50	432
4 300	0.20	48
	0.35	126
	0.50	340

该试验的思路为模拟实际接地极线路招弧角上电弧的燃弧条件,试验电压 U 对应故障点处招弧角

的开路电压, 将测得的最大临界熄弧电流与故障点最大短路电流比较, 若故障点最大临界熄弧电流较大, 则判断电弧不熄灭; 反之, 则判断电弧熄灭。

由于故障点对应的招弧角的开路电压及最大短路电流与故障点所在位置相关, 因此综合输电线路的系统参数确定不同故障点的开路电压以及最大短路电流, 即可确定对应招弧角的形式及间隙距离。

通过分析测量结果可知, 对应招弧角间隙距离均为 0.2 m 时, 若测试电压 E 由 2 850 V 增大至 4 300 V, 其最大临界熄弧电流由 55 A 下降至 48 A。表明测试电压 E 越大, 对应的最大临界熄弧电流越小。

因此, 当试验电压高于故障点的开路电压时, 试验所得的最大临界熄弧电流小于故障点实际对应的最大临界熄弧电流, 即可判断该条件下电弧必然熄灭; 反之, 试验结果不能作为电弧熄灭的判据。伊泰普试验中电压最高为 4 300 V, 因此其试验结果仅适用于故障点开路电压不大于 4 300 V 的输电线路。

2.2 泰西蒙设计方法

泰西蒙在 500 kV 金属回线的工程设计过程中采用了伊泰普的理论分析数据(图 4)。分析过程中采用电弧伏安特性曲线^[9]与外回路配合的方法进行分析见图 6。认为电弧长度与招弧角间隙长度相同, 并未考虑电弧拉长的影响。

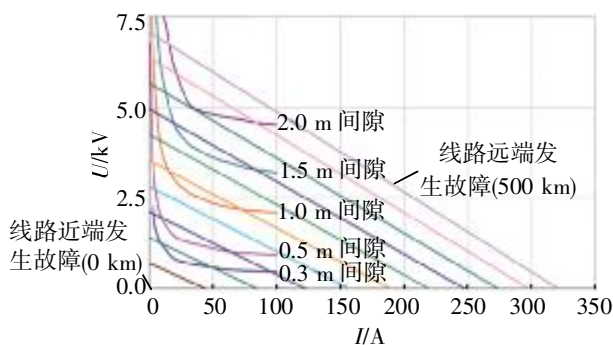


图 6 泰西蒙中招弧角间隙设计

Fig. 6 Design of arcing horns in Teshmont project

分析结果表明, 当考虑杆塔电阻为 10 Ω 时, 若输电线路功率由 2 000 MW 降至 500 MW 时, 对应 0.3 m 的招弧角间隙保护范围由 2% 上升至 14%^[9]。表明在小容量、短距离的系统中, 招弧角效果较高, 但是在大容量、长距离的传输系统中, 招弧角虽然在引导电弧远离绝缘子方面效果显著, 但是熄弧效果不显著。

3 结语

开放空间电弧的物理过程极其复杂, 其形态受到电磁力、热浮力、风力等众多因素的影响。前人的研究主要集中于电弧的电位梯度、伏安特性等方面,

且主要集中于小电流、短间隙电弧的研究。

理论上, 通过电弧伏安特性与外回路的输出特性相结合, 可判断电弧熄灭与否; 然而实际上, 电弧伏安特性与电弧长度相关, 且电弧长度的影响因素众多, 难以简单考量, 因此电弧伏安特性作为电弧熄灭判据的界定能力有限。与之相对的, 通过模拟实际输电线路的条件进行燃弧试验所得结果能够更为直接的得到工程运用所需的结果, 然而由于试验难度过大, 试验数据匮乏, 难以在不同参数的输电线路中推广运用, 需进行对应的试验。

参考文献:

- [1] BROWNE T E. The electric arc as a circuit element[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1955, 102(1): 27-37.
- [2] BROWNE T E. Circuit interruption: Theory and techniques[M]. New York: Marcel Dekker. Inc., 1984.
- [3] STOKES A D, OPPENLANDER W T. Electric arcs in open air[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1991, 24(1): 26.
- [4] STROM A P. Long 60-cycle arcs in air[J]. IEEE Transactions on Electrical Engineering, 1946, 65(3): 113-118.
- [5] STEINMETZ C P. Electric power into light, section VI[J]. Trans. Amer. Inst. Elect. Eng., 1906(25): 802.
- [6] NOTTINGHAM W B. A new equation for the static characteristic of the normal electric arc[J]. Trans. Amer. Inst. Elect. Eng., 1923(42): 302.
- [7] VAN A R, WARRINGTON C. Reactance relays negligibly affected by arc impedance[J]. Elect. World, 1931, 98(12): 502-505.
- [8] MILLER D B, HILDENBRAND J L. DC arc model including circuit constraints[J]. IEEE Trans. Power App. Syst., 1973, (PAS-92)6: 1926-1934.
- [9] COBINE J D. Gaseous Conductors[M]. New York: McGraw-Hill, 1941: 371-378.
- [10] IGNATKO V P. Electric characteristics of ac open heavy-current arcs[C]//Proceedings of 3rd Int. Symp. Switching Arc Phenom.[S.l.]: IEEE, 1977: 98-102.
- [11] 谷山强, 何金良, 陈维江, 等. 架空输电线路并联间隙防雷装置电弧磁场力计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 140-145.
GU Shanqiang, HE Jinliang, CHEN Weijiang, et al. Magnetic force computation for the electric arc of parallel gap lightning protection device on overhead transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 140-145.
- [12] GU S Q, HE J L, ZHANG B, et al. Movement simulation of long electric arc along the surface of insulator string in free air[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1359-1362.

- [13] 司马文霞,谭 威,杨 庆,等.基于热浮力—磁场力结合的并联间隙电弧运动模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19):138-145.
SIMA Wenxia,TAN Wei,YANG Qing,et al. Long AC arc movement model for parallel gap lightning protection device with consideration of thermal buoyancy and magnetic force[J]. High Voltage Engineering, 2011, 31(19):138-145.
- [14] 司马文霞,张 智,杨 庆,等. 110 kV 复合绝缘子棒形并联间隙工频电弧疏导过程的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 114-121.
SIMA Wenxia,ZHANG Zhi,YANG Qing,et al. Experimental research on power frequency arc movement process of 110 kV composite insulators in rod shape parallel gap lightning protection devices[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(31): 114-121.
- [15] 曹荣江,朱拱照,崔景春. 关于超高压线路上潜供电弧持续现象的研究(第一部分)[J]. 高电压技术, 1975, 1(1):27-77.
CAO Rongjiang,ZHU Gongzhao,CUI Jingchun. Research of continuous arcing process of secondary arc on EHV transmission lines (Part I)[J]. High Voltage Engineering, 1975, 1(1):27-77.
- [16] KOHLER A. Earth fault clearing on an HVDC transmission line, with special consideration of the properties of the DC arc in free air[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967(3):298-304.
- [17] PEIXOTO C, PORTELA C, CANELLAS J, et al. DC arc extinction on long electrode lines for HVDC transmission [C]//International Conference on DC Power Transmission. IREQ, CSE: IEEE, 1984: 127-133.
- [18] JANKOV V, STOBART M. HVDC system performance with a neutral conductor[C]//2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). New Orleans, USA: IEEE, 2010: 188-191.
- [19] 王章启,何俊佳. 电力开关技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2003.
WANG Zhangqi, HE Junjia. Power switch technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003.
- 张冯硕(1984—),男,硕士研究生,工程师,从事超(特)高压输电线路设计、研究工作。
- 徐志坚(1992—),男,硕士研究生,研究方向为高电压新技术和脉冲功率技术。
- 李 化(1979—),女,博士,副教授,研究方向为高电压新技术和脉冲功率技术。